



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

②① Aktenzeichen: 198 27 139.5  
②② Anmeldetag: 18. 6. 98  
④③ Offenlegungstag: 23. 12. 99

DE 198 27 139 A 1

⑦① Anmelder:  
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

⑦② Erfinder:  
Simon, Ulrich, Dr., 07751 Rothenstein, DE;  
Wolleschensky, Ralf, Dipl.-Phys., 99510 Schöten, DE

⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

|    |               |
|----|---------------|
| DE | 196 22 359 A1 |
| EP | 07 84 206 A2  |
| EP | 04 31 840 A2  |

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ Mikroskop mit einem über eine Lichtleitfaser eingekoppelten Kurzpulsaser

⑤⑦ Mikroskop mit einem über eine Lichtleitfaser in den Be-  
leuchtungsstrahlengang eingekoppelten Kurzpulsaser,  
wobei dem Ende der Lichtleitfaser Mittel zur Erhöhung  
der mittleren Leistung der in das Mikroskop eingekoppel-  
ten Strahlung mittels mindestens eines dispergierenden  
Elementes nachgeordnet sind.

DE 198 27 139 A 1

2

Kurze Pulse besitzen je nach Pulslänge eine bestimmte spektrale Bandbreite. In dispersiven Medien wie z. B. dem Glas einer optischen Faser verändert sich die Pulslänge beim Durchlaufen des Mediums durch den Einfluß der Gruppengeschwindigkeitsdispersion (GVD).

Dies geschieht aufgrund der zeitlichen Aufspaltung der einzelnen Frequenzanteile der Pulse, da in normal dispersiven Medien (Glas) die rotverschobenen Frequenzanteile eine höhere Gruppengeschwindigkeit als die blauverschobenen Frequenzanteile besitzen. Das Spektrum bleibt hier von unberührt.

Diese Pulsverbreiterung kann mit Hilfe einer geeigneten Prechirp-Einheit (z. B. bestehend aus Gittern oder Prismen, bzw. einer Kombination aus beiden) wie in DE-GM 296 09 850 kompensiert werden.

Hierzu werden die spektralen Komponenten der Pulse in der Prechirp-Einheit zeitlich so angeordnet, daß die blauverschobenen den rotverschobenen Frequenzanteilen im Vergleich zur Mittenfrequenz vorauslaufen. Bei einer anschließenden Kopplung in ein dispersives Medium (z. B. einer opt. Glasfaser) wird diese zeitliche Aufspaltung der Pulsfrequenzanteile wieder aufgehoben. Am Ende des opt. Mediums (Glasfaser) erscheinen somit die Pulse wieder in ihrer ursprünglichen Form, d. h. in der Form wie sie aus dem Laser kamen.

Zusätzlich zu diesen linearen Effekten treten in optischen Medien jedoch auch nichtlineare, d. h. von der Intensität der Laserstrahlung abhängige Effekte auf.

Diese Effekte (SPM, XPM, etc.) wirken sich auf die spektrale Breite bzw. das Pulsprofil aus.

Sie schränken in den meisten Fällen, die in einer Prechirp-Einheit minimal erreichbare Pulslänge ein. Diese Effekte sind bei einer Kopplung eines Kurzpulslasers unerwünscht.

Grundsätzlich können sie durch eine Begrenzung der Intensität der Laserstrahlung unter einen kritischen Wert ( $I_{krit}$ ) vermieden werden. In einem Kurzpulslaser wird die Intensität ( $I$ ) durch die Pulslänge ( $\tau$ ), die Repetitionsrate ( $f$ ), die mittlere Leistung ( $P_{avg}$ ) und durch den Strahlquerschnitt ( $A$ ) mit folgender Gleichung bestimmt:

$$I = \frac{P_{avg}}{\tau \cdot f \cdot A} < I_{krit}$$

In moden- sowie polarisationserhaltenden Glasfasern wird die Querschnittsfläche durch die Wellenlänge der zu koppelnden Laserstrahlung und die Repetitionsrate durch das verwendete Lasersystem festgelegt.

Die Änderung der Pulslänge eines vorher durch eine Prechirp-Einheit geschickten Pulses beim Durchlaufen der Glasfaser ist in Fig. 2 im oberen Teilbild dargestellt. Man erkennt, daß die Pulslänge am Ende der Faser minimal ist. Bei gleichbleibender mittlerer Leistung wächst somit die Intensität zum Faserende hin an.

Gleichzeitig wächst auch der Einfluß der nichtlinearen Effekte (SPM) am Ende der Faser. Dies ist im unteren Teilbild in Fig. 2 durch die Änderung der spektralen Breite sichtbar.

Bei einer vorgegebenen Pulslänge am Ausgang der Glasfaser wird somit die mittlere Leistung die in das Mikroskop eingekoppelt werden kann, durch die nichtlinearen Effekte limitiert.

Die Erfindung hat die Aufgabe, den Einfluß nichtlinearer Effekte auf das Pulsprofil zu minimieren.

Die Aufgabe wird durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst. Bevorzugte Weiterbildungen sind Gegen-

stand der abhängigen Ansprüche.

Erfindungsgemäß wird zur Vermeidung der nichtlinearen Effekte am Faserende die Intensität verringert.

Dies kann beispielsweise vorteilhaft durch ein Vergrößern der Querschnittsfläche  $A$  (siehe obige Gleichung) erfolgen. Diese Vergrößerung muß an jenem Punkt erfolgen, an dem die Pulslänge und damit die Intensität den kritischen Wert erreichen. Die weitere Komprimierung des Pulses erfolgt somit in einem Bereich mit größerer Querschnittsfläche so daß nichtlineare Effekte vermieden werden können.

Dabei gilt: Je größer die Dispersion im Bereich mit großem Querschnitt desto größer ist die koppelbare mittlere Leistung.

Eine Faser deren Kerndurchmesser am Faserende ansteigt, ist in Fig. 4 dargestellt.

Es können statt einer Faser mit ansteigendem Querschnitt auch zwei oder mehrere Fasern, vorteilhaft auch ineinander steckbar, verwendet werden, wobei der Querschnitt der einzelnen Fasern in Richtung der Beleuchtung zunimmt.

Besonders vorteilhaft ist jedoch der Einbau eines stark dispergierenden Elementes in das Laser-Scanning-Mikroskop. Solch ein stark dispergierendes Element ist z. B. jede Art von Prismen bzw. Gitterkompressoren. Weiterhin sind spezielle Glasmaterialien oder Kristalle (z. B.  $\text{TeO}_2$ ), wie sie beispielsweise in Acousto-Optischen Geräten eingebaut werden, geeignet.

In Figur ist eine Anordnung unter Verwendung eines Acousto-Optischen Modulators dargestellt.

Bei Einsatz dieser AO-Geräte (AOM; AOD, AOTF) können die nichtlinearen Effekte verhindert (d. h. die koppelbare mittlere Leistung bei vorgegebener Pulslänge) sowie gleichzeitig all ihre Vorteile in der Laser-Scanning-Mikroskopie wie:

- das Scannen des Laserstrahles
- das kontinuierliche Abschwächen
- das schnelle Schalten im ms-Bereich
- und das Verzögern der Phase

ausgenutzt werden.

Speziell bei der Verwendung als AOM kann dieser Kristall zur Erhöhung der Dispersion auch mehrfach durchlaufen werden. Dies geschieht besonders einfach bei Verwendung der 0-ten Ordnung und bei entsprechender Auspiegung der 1. Ordnung, wie in Figur dargestellt.

Die Erfindung und ihre Vorteile wird nachstehend anhand der schematischen Zeichnungen näher erläutert.

In Fig. 1 ist schematisch die Einkopplung eines Kurzpulslasers KPL über eine Prechirpeinheit PE und eine Lichtleitfaser in ein Mikroskop dargestellt.

Das Mikroskop ist vorteilhaft, wie in Fig. 8 dargestellt, ein Laser-Scanning-Mikroskop (LSM).

Fig. 2a zeigt den Verlauf der Pulslänge und der Spektralbreite entlang der Faserlänge.

Fig. 2b zeigt die minimal mögliche Pulslänge in Abhängigkeit von der mittleren Leistung.

Fig. 4 zeigt eine Lichtleitfaser mit zum Ende hin in Beleuchtungsrichtung ansteigendem Querschnitt.

Fig. 5 zeigt die Anordnung eines Akustooptischen Modulators AOM am Faserende im Mikroskop.

In Fig. 6 ist der durch das (hier nicht dargestellte) Faserende in den AOM eintretende Strahl sowie gebeugten her austretenden Strahlen 0-ter und erster Ordnung dargestellt.

Der AOM wird vorteilhaft wie in Fig. 7a in der 0-ten Ordnung betrieben, und die erste Ordnung wird aus dem Strahlengang (nicht dargestellt) dargestellt herausgespiegelt.

Zur Erhöhung der Dispersion und der mittleren Leistung ist ein Mehrfachdurchlauf der 0-ten Ordnung im AOM er-

wünscht, was beispielsweise auch durch zusätzliche Anordnung eines Spiegels zur Mehrfachreflektion der 0-ten Ordnung hinter dem AOM, wie in Fig. 7b dargestellt, realisiert werden kann.

In Fig. 8 sind schematisch eine Mikroskopeinheit M und ein Scankopf S dargestellt, die eine gemeinsame optische Schnittstelle über eine Zwischenabbildung aufweisen und ein LSM bilden.

Der Scankopf S kann sowohl an den Phototubus eines aufrechten Mikroskopes sowie auch an einen seitlichen Ausgang eines inversen Mikroskopes angesetzt werden.

Es ist ein zwischen Auflichtscan und Durchlichtscan mittels eines schwenkbaren Spiegels 14 umschaltbarer mikroskopischer Strahlengang dargestellt, mit Lichtquelle 1, Beleuchtungsoptik 2, Strahlteiler 3, Objektiv 4, Probe 5, Kondensor 5, Lichtquelle 7, Empfängeranordnung 8, einer ersten Tubuslinse 9, einem Beobachtungsstrahlengang mit einer zweiten Tubuslinse 10 und einem Okular 11 sowie einem Strahlteiler zur Einkopplung des Scanstrahls dargestellt.

Ein Lasermodul 13.1, 13.2 nimmt die Laser auf und ist über Monomode-Lichtleitfasern 14.1, 14.2 mit der Lasereinkoppeleinheit des Scankopfes S verbunden.

Die Einkopplung der Lichtleitfasern 14.1, 14.2 erfolgt mittels einer verschiebblichen Kollimationsoptik 16, auf die noch näher eingegangen wird, sowie Strahlumenkelementen 17.1, 17.2.

Mittels eines teildurchlässigen Spiegels 18 wird ein Überwachungsstrahlengang in Richtung einer Monitordiode 19, der, vorteilhaft auf einem nicht dargestellten drehbaren Filterrad Linienfilter 21 sowie Neutralfilter 20 vorgeordnet sind, ausgeblendet.

Die eigentliche Scaneinheit besteht aus Scanningobjektiv 22, Scanner 23, Hauptstrahlteiler 24 und einer gemeinsamen Abbildungsoptik 25 für Detektionskanäle 26.1-26.4.

Ein Umlenkprisma 27 hinter der Abbildungsoptik 25 spiegelt die vom Objekt 5 kommende Strahlung in Richtung dichroitischer Strahlteiler 28 im konvergenten Strahlengang der Abbildungsoptik 25, denen in Richtung und senkrecht zur optischen Achse verstellbare und in ihrem Durchmesser veränderbare Pinholes 29, individuell für jeden Detektionskanal sowie Emissionsfilter 30 und geeignete Empfänger-elemente 31 (PMT) nachgeordnet sind.

Es erfolgt eine Einkopplung der Strahlung eines KurzpulsLasers KPL in Glasfaser 14.1, vorzugsweise einer Single-Mode-Glasfaser.

Wie in DE 296 09 850 dargestellt, ist zwischen dem Laser und der Lichtleitfaser eine Prechirpeinheit PE angeordnet.

Am Eingang des Scanmoduls ist wie bereits beschrieben ein akustooptischer Modulator AOM vorgesehen.

Die Einkoppeloptik 33 zur Einkopplung der Laserstrahlung weist zur Einkopplung nicht dargestellte Linsensysteme auf, deren Brennweite durch den Strahlquerschnitt der Laser und die für die optimale Einkopplung erforderliche numerische Apertur festgelegt ist.

Im Lasermodul 13.2, sind Einzel- und Multiwellenlängenlaser vorgesehen, die einzeln oder gemeinsam über einen AOTF in eine oder mehrere Fasern eingekoppelt werden.

Auch die Mischung der Strahlung verschiedener Laser am Fasereingang ist möglich und kann anhand der schematisch dargestellten, auswechselbarer und schaltbarer Teiler-spiegel 39 erfolgen.

Die in Fig. 2 und 3 divergent aus dem Faserende der Fasern 14.1,2 an der Scaneinheit s austretende Laserstrahlung wird und mittels der Kollimationsoptik 16 auf einen Unendlichstrahl kollimiert.

Das erfolgt vorteilhaft mit einer einzelnen Linse, die durch Verschiebung entlang der optischen Achse mittels ei-

ner über eine zentrale Ansteuereinheit 34 ansteuerbare Steuereinheit 37 eine Fokussierungsfunktion hat, indem ihr Abstand zum Ende der Lichtleitfaser 14.1,2 an der Scaneinheit erfindungsgemäß veränderbar ist.

Durch mehrere Einkoppelfasern und Kollimationsoptiken für unterschiedliche Wellenlängen können unabhängig verschiedene chromatische Kompensationen eingestellt werden.

Eine Monitordiode 19, die auch, hier nicht dargestellt, eine vorgesetzte Fokussierlinse aufweisen kann, wirkt in Verbindung mit einem linien- oder bereichsselektiven Filterrad oder Filterschieber 21, angesteuert von einer Steuereinheit 36, zur permanenten Überwachung der in das Scanmodul eingekoppelten Laserstrahlung, insbesondere um die Leistung in einer bestimmten Laserlinie isoliert zu kontrollieren und gegebenenfalls über den AOTF 32 mittels eines Regelsignales der Ansteuereinheit 34 zu stabilisieren. Vorteilhaft kann der Scanner 23 selbst als AOM oder AOD ausgebildet sein, wobei jeweils zwei AOM oder AOD für die beiden Scanrichtungen zusammenwirken können.

Hier ist der Scanner gleichzeitig das erfindungsgemäße dispergierende Element und die Kombination zweier Elemente ersetzt den mehrfachen Durchlauf durch einen AOM, wie in Fig. 7b dargestellt.

#### Patentansprüche

1. Mikroskop mit einem über eine Lichtleitfaser in den Beleuchtungsstrahlengang eingekoppelten KurzpulsLaser, vorzugsweise mit Pulslängen im Subpico- oder Picosekundenbereich, wobei zwischen Laser und Lichtleitfaser eine optische Anordnung zur wellenlängenabhängigen zeitlichen Verzögerung der Laserpulse vorgesehen ist, wobei dem Ende der Lichtleitfaser in Beleuchtungsrichtung Mittel zur Erhöhung der mittleren Leistung der in das Mikroskop eingekoppelten Strahlung mittels mindestens eines disperdierenden Elementes nachgeordnet sind.
2. Mikroskop nach Anspruch 1, mit dem Lichtleitfaserende in Beleuchtungsrichtung nachgeordneten Prismen und/oder Gittern.
3. Mikroskop nach Anspruch 1 oder 2, mit mindestens einem dem Lichtleitfaserende nachgeordneten akustooptischen Modulator wie AOM, AOD und/oder AOTF.
4. Mikroskop nach einem der Ansprüche 1-3, wobei das dispergierende Element im Mikroskopgehäuse an der Einkoppelstelle der Lichtleitfaser angeordnet ist.
5. Mikroskop nach einem der Ansprüche 1-4, mit Mitteln zur rasterartigen Erfassung eines Objektes.
6. Laser-Scanning-Mikroskop nach einem der Ansprüche 1-5, mit mindestens einem akustooptischen Modulator als Scanner in mindestens einer Scanrichtung.
7. Mikroskop nach einem der Ansprüche 1 oder 5, mit mindestens einer Lichtleitfaser zur Einkopplung mit in Richtung der Beleuchtung in Richtung zum Mikroskop ansteigendem Faserquerschnitt.
8. Mikroskop nach Anspruch 7, mit mehreren ineinander steckbaren Fasern, wobei der Faserquerschnitt in Richtung der Beleuchtung zum Mikroskop zunimmt.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

Fig.1

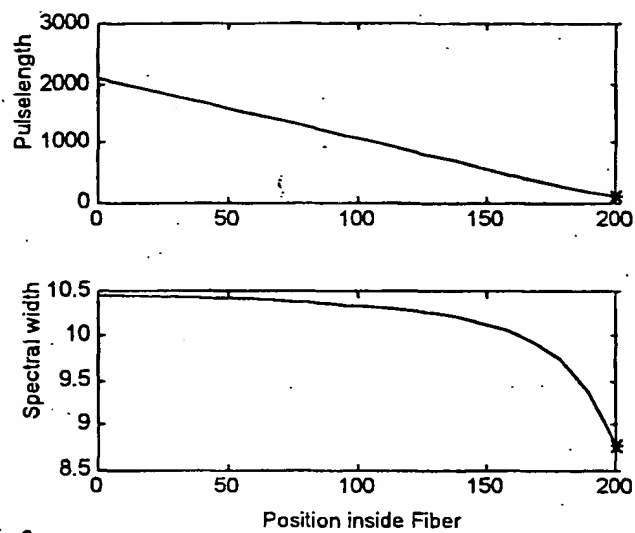
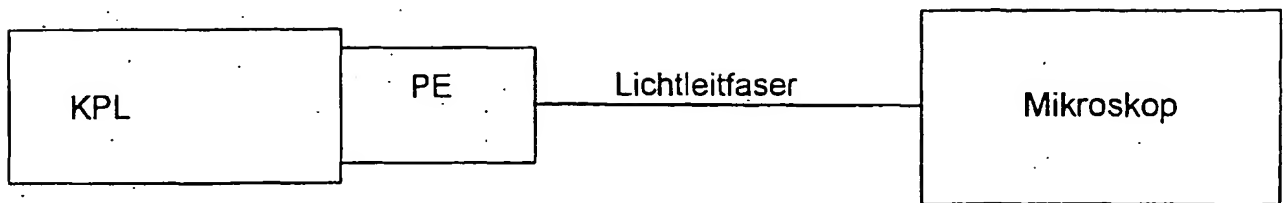


Fig.2

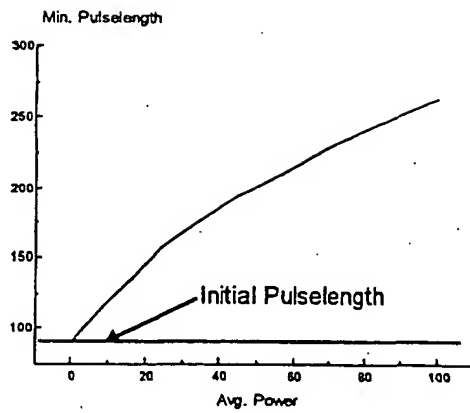


Fig.3

Fig.4

Lichtleitfaser

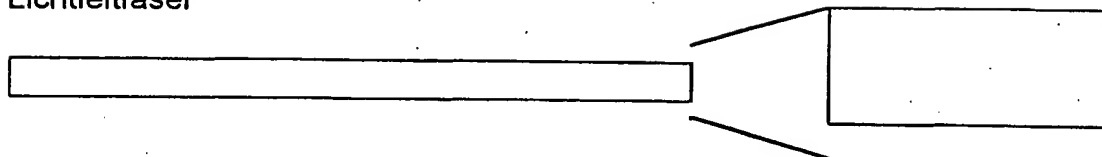


Fig. 5

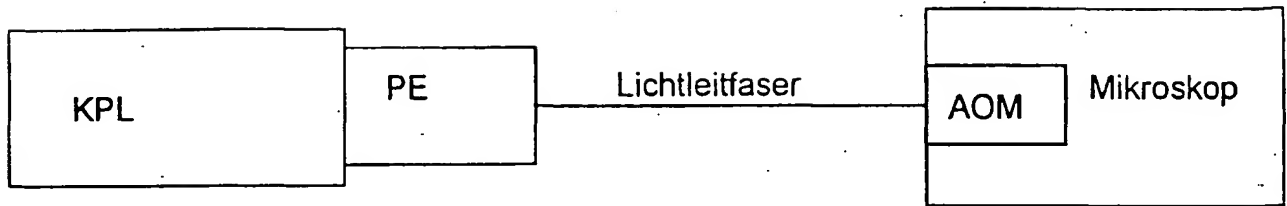


Fig.6

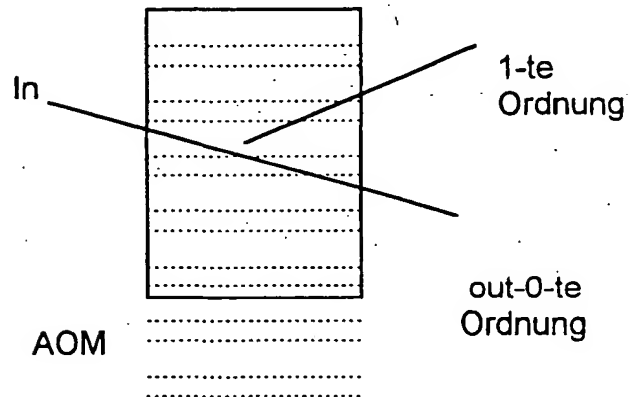


Fig.7a

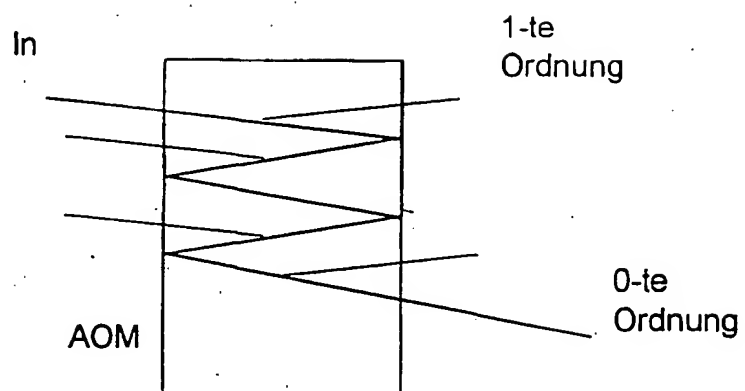


Fig.7b

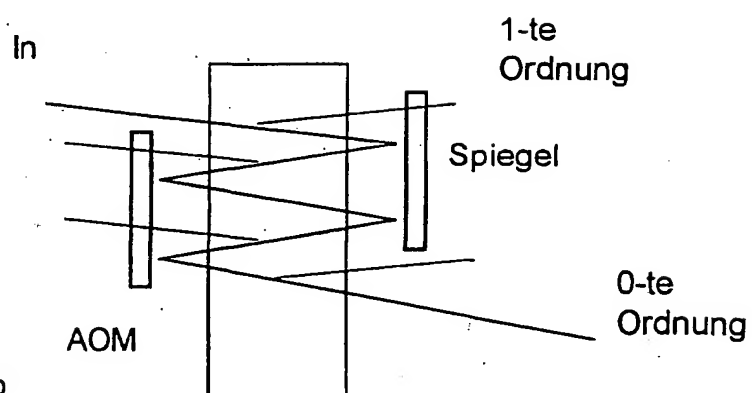


Fig. 8

